



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

TURBODMYCHADLA V MOTORSPORTU

TURBOCHARGERS IN MOTORSPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stanislav Chovanec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Knotek

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Stanislav Chovanec
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Knotek
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Turbodmychadla v motorsportu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Turbodmychadla jsou dnes velmi často používaným prostředkem pro zvýšení výkonu spalovacích motorů. Proto je jejich použití v motorsportu velmi časté. Cílem této práce je zmapovat využití turbodmychadel v motorsportu s důrazem na porovnání rozdílů mezi konstrukcí a využitím turbodmychadel v jednotlivých kategoriích a také vzhledem k civilnímu využití.

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod do přeplňování
2. Přeplňování turbodmychadlem
3. Využití turbodmychadla v motorsportu
4. Porovnání využití turbodmychadel v jednotlivých kategoriích

Seznam literatury:

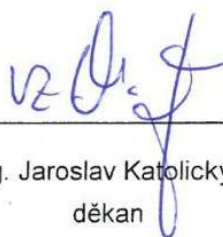
HEISLER, H. Advanced Engine Technology. SAE International, 1995. ISBN 1-56091-734-2.
Power Boost Technology. 2007. ISBN Number: 978-0-7680-1906-3.
HOFMANN, K. Alternativní pohony. VUT v Brně, FSI, 2003.
MTZ: MOTORTECHNISCHE ZEITSCHRIFT. Springer Automotive Media.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 15. 12. 2015



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím turbodmychadel v motorsportu, nejmodernějšími použitými technologiemi a regulacemi pro jednotlivé soutěže. Dále porovnáním technologií použitých vzhledem k civilnímu užití.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přeplňování, turbodmychadlo, regulace, motorsport, hybridní technologie

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the use of turbochargers in motorsport, latest used technologies and regulations for each competition. Furthermore, the thesis compare technologies used in relation to civilian use.

KEYWORDS

Supercharging, turbocharger, regulation, motorsport, hybrid technology



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHOVANEK, S. *Turbodmychadla v motorsportu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Knotek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Knotka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Stanislav Chovanec



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Knotkovi za rady a poznámky při psaní této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu.



OBSAH

Úvod	15
1 Úvod do přeplňování	17
1.1 Úvod do přeplňování	17
1.2 Teoretické základy přeplňování	17
1.3 Rozdělení přeplňování	18
2 Kompresory s mechanickým pohonem	19
2.1 Rootsovo dmychadlo	20
2.2 Lysholmovo dmychadlo	21
2.3 Radiální odstředivé dmychadlo	22
3 Přeplňování pomocí dynamických efektů	23
3.1 Přeplňování rezonancí v sacím potrubí	23
3.2 Helmholtzův rezonátor	23
3.3 Comprex	23
4 Přeplňování turbodmychadlem	25
4.1 Základní části turbodmychadla	26
4.1.1 Turbína	26
4.1.2 Kompresor	27
4.2 Regulace turbodmychadla	28
4.2.1 Obtokový ventil turbíny	28
4.2.2 Variabilní geometrie turbíny	28
4.2.3 Změna šířky statoru turbíny	29
5 Využití turbodmychadel v motorsportu	31
5.1 Formule 1	31
5.1.1 Rozdělení turbodmychadla	31
5.1.2 Renault F1 – V6 turbo hybrid	32
5.2 World Endurance Championship – Le Mans	33
5.2.1 AUDI R18 E-TRON QUATTRO	33
5.3 World Rally Championship	34
5.4 World Touring Car Championship	35
6 Porovnání turbodmychadel pro motorsport a komerční využití	37
6.1 Kluzná a kuličková ložiska	37
6.2 Použité materiály	38
6.3 Životnost a cena	38
7 Srovnání kategorií v motorsportu	39
Závěr	41



Seznam použitých zkratek a symbolů	47
Seznam obrázků a grafů	49
Seznam tabulek	51



ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá využitím turbodmychadel v motorsportu jakožto prostředkem pro zvýšení výkonu spalovacích motorů. Jejich použití je v motorsportu velmi časté. Turbodmychadlo využívá energie proudících výfukových plynů, které by jinak odešly nevyužity.

Téma turbodmychadel v motorsportu je aktuální zejména kvůli největšímu trendu této doby, kterým je downsizing. Jeho principem je snížení objemu válců a spotřeby motoru při zachování nebo i zvýšení výkonu. K tomu jsou turbodmychadla dokonalým prostředkem.

Cílem této práce je seznámit čtenáře s úvodem do přepřňování a následně popsat jednotlivé možnosti přepřňování. Čtvrtá kapitola je věnována turbodmychadlům samotným, na které navazují možnosti využití turbodmychadel v motorsportu, kde jsou popsány nejmodernější dostupné technologie. V posledních dvou kapitolách se bakalářská práce zabývá porovnáním použitých technologií v motorsportu vůči civilním turbodmychadlům a srovnáním vybraných parametrů ve čtyřech soutěžích.

Turbodmychadla prochází neustálým vývojem. Jedním z důvodů je nástup diesellových motorů do vytrvalostní soutěže Le Mans, ale také kvůli snaze dosáhnout stále vyššího výkonu a nižší spotřeby v soutěžích jako jsou F1, WRC, WTCC a mnoha dalších.



1 ÚVOD DO PŘEPLŇOVÁNÍ

1.1 ÚVOD DO PŘEPLŇOVÁNÍ

Výkon motoru závisí na množství energie ve formě paliva, které může být přivedeno do válců. Množství paliva, které může být spáleno ve válci je omezeno množstvím přivedeného vzduchu. Teoretickým směšovacím poměrem je 1:14,8 [27]. To znamená, že na 1 kg benzínu potřebujeme 14,8 kg vzduchu. V atmosférickém motoru vhání vzduch do válců atmosférický tlak, ale kvůli odporu sacího systému, ve ventilech a ohybech v sacím potrubí, je tlak vzduchu mnohem menší než tlak atmosférický. Dalším faktorem ovlivňujícím spalování, je hustota vzduchu. Ta může být zvýšena jak použitím kompresoru, tak turbodmychadla s chladičím systémem.

Přeplňování je jedním ze základních faktorů v trendu snižování zdvihového objemu takzvaného downsizingu. V podstatě se jedná o nahrazení atmosférického motoru motorem přeplňovaným o nižším zdvihovém objemu pro dosažení stejného anebo vyššího výkonu. Menšími rozměry motoru dosáhneme snížením hmotnosti pohonné jednotky, která také přispívá ke snížení spotřeby a následně i snížení emisí.

V dnešní době se nejvíce využívá přeplňování pomocí turbodmychadel, kompresorů nebo jejich kombinací. Osobní automobily se vznětovým motorem v Evropě mají více jak 50% podíl na trhu s osobními automobily, hlavně díky skvělým vlastnostem přeplňování. Automobilů se zážehovým motorem s přeplňováním je vyrobeno přibližně 30% ze všech typů automobilů. [2] [3] [4] [5]

1.2 TEORETICKÉ ZÁKLADY PŘEPLŇOVÁNÍ

Efektivní výkon motoru je hlavním parametrem pro přeplňování. Zvýšení výkonu se dá dosáhnout úpravou většiny parametrů, které jsou uvedené v následujícím vzorečku pro výpočet efektivního výkonu motoru P_e [2] [3]:

$$P_e = \frac{i V_H p_e n}{\tau} \quad [\text{W}] \quad i [-] - \text{počet válců v motoru} \quad (1)$$

n [min^{-1}] – otáčky motoru

p_e [MPa] – plnicí tlak

V_H [dm^3] – zdvihový objem jednoho válce

τ [-] – taktnost motoru (dvoudobý motor $\tau=1$, čtyřdobý motor $\tau=2$)

Z dané je vidět, že jsou tři možnosti, kterými se může zvýšit výkon motoru [2] [3]:

- Zvýšením počtu válců i
- Zvýšením otáček motoru n
- Zvýšením plnicího tlaku p_e



Při přeplňování je využíváno zvyšování plnicího tlaku p_e , který je dán vztahem [2] [3]:

$$p_e = \frac{H_u}{\sigma_t \lambda_z} \rho_{pl} \eta_{pl} \eta_i \eta_m \text{ [W]} \quad (2)$$

Teoretický směšovací poměr σ_t a dolní výhřevnost paliva H_u budou konstantní, z čehož vyplývá, že plnicí tlak je možné zvýšit zbývajícími pěti parametry [2] [3]:

- Mechanickou účinností motoru η_m
- Indikovanou účinností motoru η_i
- Hustotou plnicího vzduchu ρ_{pl}
- Velikostí přebytku vzduchu λ_z
- Plnicí účinností motoru η_{pl}

Přeplňování využívá zvětšování hustoty vzduchu ρ_{pl} , která také umožňuje dopravit do válce větší množství paliva. [2] [3]

1.3 ROZDĚLENÍ PŘEPLŇOVÁNÍ

Existuje několik možností, jak dostat do válce více vzduchu. Proto se přeplňování v zásadě rozděluje do čtyř skupin, které jsou děleny na:

- Kompresory s mechanickým pohonem
- Přeplňování pomocí dynamických efektů
- Turbodmychadla
- Kombinované (kombinace turbodmychadla a kompresoru)

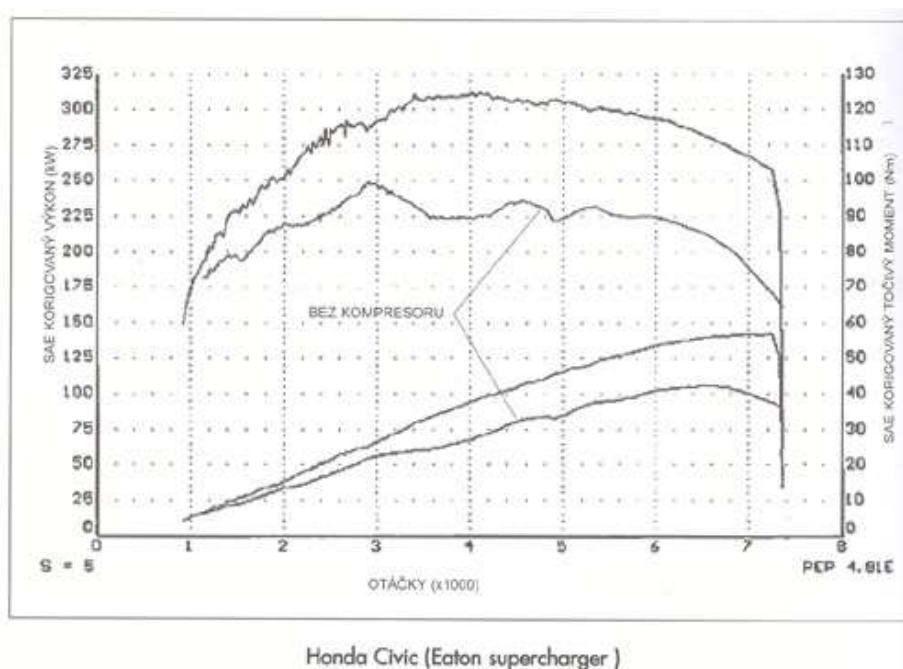
2 KOMPRESORY S MECHANICKÝM POHONEM

Mechanický kompresor je alternativou turbodmyhadla. Nevyužívá však energie proudících výfukových plynů, ale je poháněn ozubeným převodem od klikové hřídele.

Výhoda přepřlňování kompresorem vůči přepřlňování turbodmyhadlem je ta, že objem dodaného vzduchu je přímo úměrný otáčkám motoru. Navíc jeho efektivní rozsah práce není limitován náparem vzduchu, takže při přepřlňování kompresorem je možné rychleji dosáhnout vyššího točivého momentu.

Jelikož je kompresor poháněn klikovou hřídelí, znamená to, že kompresor spotřebovává část výkonu motoru. Dalšími nevýhodami jsou nerovnoměrnost plnicího tlaku, vyšší hlučnost a nevyužitá energie odcházejících výfukových plynů. Oproti tomu ale kompresory netrpí „turbo efektem“.

„Turbo efekt“ je čas, který motor potřebuje k vytvoření dostatečného tlaku výfukových plynů k roztočení turbíny v turbodmyhadle a následnému stlačení vzduchu kompresorem.



Obr. 2.1 Grafy vývoje výkonu a točivého momentu [6]

Na obrázku můžeme vidět graf průběhu točivého momentu a výkonu na otáčkách u Hondy Civic s kompresorem a bez kompresoru. Z grafu lze vidět, že nejvyšší nárůst maximálního výkonu je zhruba o 25% a maximálního točivého momentu o 30%.

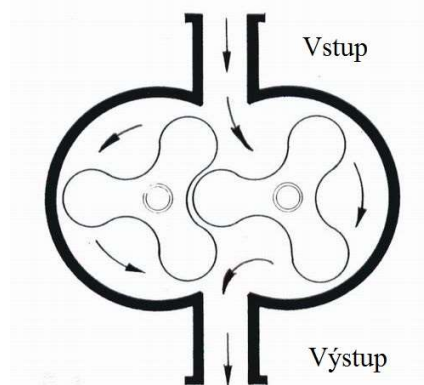
Při nadměrně vysokých otáčkách dochází k nedostatečnému plnění válců. Klesající hodnota točivého momentu nemůže být vyrovnána vyššími otáčkami a to má za důsledek pokles výkonu motoru.

V automobilech se můžeme střetnout s různými konstrukcemi mechanických kompresorů. Mezi nejčastěji používané patří Rootsovo a Lysholmovo dmyhadlo.



2.1 ROOTSOVO DMYCHADLO

Rootsovo dmychadlo se skládá ze dvou rotorů, přičemž každý z nich má obvykle tři laloky. Rotory se otáčejí v protisměru kvůli vhánění vzduchu ze vstupu do výstupu. Tímto pohybem se však vzduch nestlačuje. Tlak se vytváří tím, že kompresor dodává vzduch rychleji, než jej motor dokáže spotřebovat a tím se vytvoří tlak v sacím potrubí.



Obr. 2.2 Schéma Rootsova dmyhadla [7]

Obrázek 2.2 ukazuje klasický typ konstrukce Rootsova dmyhadla. Vstup je umístěn nad hlavní tělem a výstup pod ním. Ačkoli je tahle konstrukce jednoduchá pro pochopení, je velmi neefektivní. Důvodem je, že při vstupu vzduchu do kompresoru dochází ve skutečnosti k nárazu proti lalokům rotoru, které se otáčejí v opačném směru.



Obr. 2.3 Umístění Rootsova dmyhadla na 1970 Dodge Charger [8]

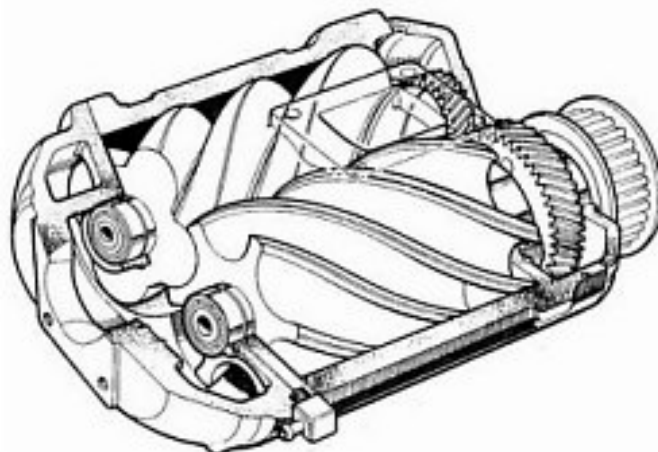
Rootsova dmychadla je možné nalézt s poněkud odlišnou konstrukcí. Přemístění vstupu má několik výhod, zvláště když je kompresor umístěn v horní části motoru a vstup směřuje dopředu. Tímto se také vyhýbá nevýhodě předešlé konstrukce. Vzduch vstupuje do komory v axiálním směru, takže nepůsobí proti lalokům rotoru.



2.2 LYSHOLMOVO DMYCHADLO

Jde o dvurotorový kompresor s dvěma oddělenými rovnoběžnými hřídeli se zakroucenými zuby do tvaru šroubovice. Hlavní rotor má 3 zuby a otáčí se vyšší rychlostí než rotor vedlejší, který má zubů 6 (jedná se o jednu z možných kombinací počtů zubů).

Zuby rotorů se při sání rozbíhají. Vzniká mezi nimi otvor, kterým se nasává vzduch. Při axiálním pohybu poté dochází ke stlačení vzduchu, uzavření sacího otvoru a vzduch pokračuje k výstupu z kompresoru. Při přechodu přes hranu výstupního otvoru nastává výtlak.



Obr. 2.4 Lysholmovo dmychadlo [7]

Kromě vysokého plnicího tlaku má také Lysholmův kompresor vysokou účinnost, široký rozsah otáček a kompaktní velikost. Na druhou stranu jeho výroba je velmi drahá, kvůli vysoké přesnosti obrábění závitů.



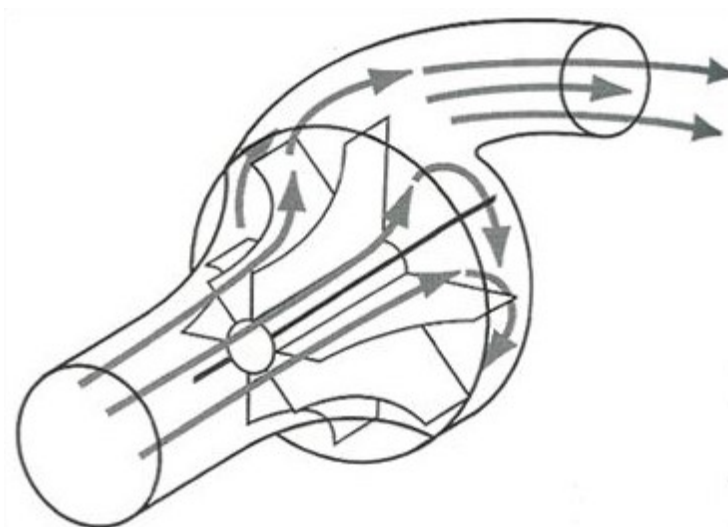
Obr. 2.5 Umístění Lysholmova dmychadla ve Fordu GT [9]

Dmychadlo kvůli své ceně najdeme spíše ve dražších sériových autech. Mezi ně patří například Ford GT, Mercedes C32 AMG a Mercedes SLR McLaren.



2.3 RADIÁLNÍ ODSŤŘEDIVÉ DMYCHADLO

Radiální odstředivé dmychadlo má podobný princip jako turbodmychadlo. Je poháněno klikovou hřídelí přes řemen. Otáčky dmychadla rostou s otáčkami motoru. To znamená, že dmychadlo má největší výkon ve vysokých otáčkách motoru, ale při nízkých otáčkách dmychadlo téměř nijak neovlivňuje výkon automobilu. [7]



Obr. 2.6 Radiální odstředivé dmychadlo [10]

Hlavní výhodou je nízký moment setrvačnosti. Díky této skutečnosti dmychadlo dosahuje poměrně nízké úrovně hluku a hmotnosti.



3 PŘEPLŇOVÁNÍ POMOCÍ DYNAMICKÝCH EFEKTŮ

3.1 PŘEPLŇOVÁNÍ REZONANCÍ V SACÍM POTRUBÍ

Jedná se o bezkompresorovou metodu využívající dynamiku tlakových vln v sacím potrubí vysokootáčkových motorů. Správným navrhnutím potrubí se při otevírání sacích a výfukových ventilů vyvolávají tlakové vlny, které způsobují, že tlak ve ventilech se výrazně liší od tlaku okolí. Využíváme odrazu tlakových vln v sacím nebo výfukovém potrubí. Určitou délkou potrubí se dá dosáhnout zvýšení tlaku uvnitř válce a to tak, že před zavřením sacího ventilu k němu dorazí vlna o vyšším tlaku, která tlak zvýší. Naopak může dorazit vlna s nižším tlakem k výfukovému ventilu v okamžiku, kdy se tento ventil zavírá a sací ventil otvírá, čímž dojde ke zvýšení tlakového spádu a zlepšení vyplachování válce a lepšímu odtoku zůstatkových plynů.

Spojením obou efektů se používá nejčastěji ve sportovních a závodních vozech, kde se díky vysokým otáčkám zkracuje potřebná doba šíření vln, z čeho vyplývá potřeba kratší délky potrubí.

Rezonance je zesílené vlastní kmitání kmitajícího systému. Ta se běžně používá u sériově vyráběných motorů, jako tzv. systém variabilní délky sání. Díky možnosti plynulé regulace délky potrubí se dosahuje vyšší účinnosti v celém spektru otáček.

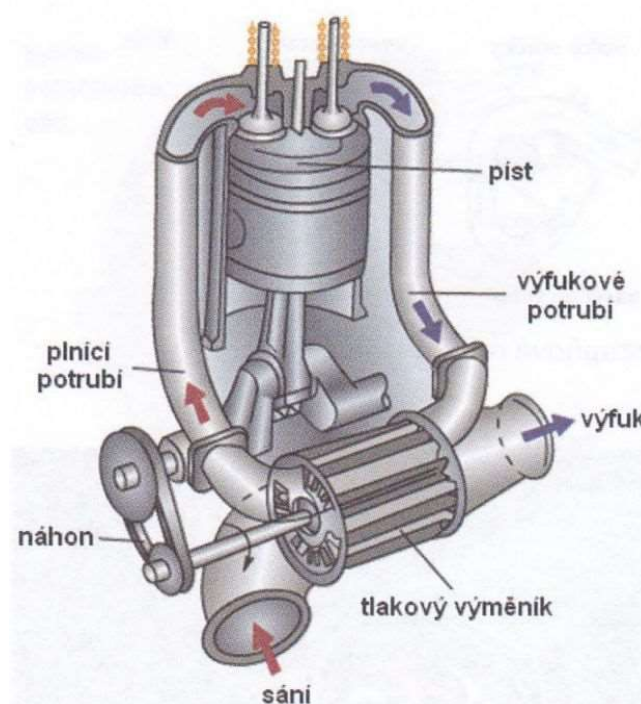
3.2 HELMHOLTZŮV REZONÁTOR

Funguje na principu zvyšování tlaku Helmholtzovým rezonátorem, který je součástí sacího potrubí. Je připojen s některými válci tak, aby frekvence rezonátoru odpovídala frekvenci otevírání sacích ventilů. Jedině při rezonančních otáčkách dochází k přeplňování, z čehož vyplývá nevýhoda tohoto systému [28]. Když překročíme rezonanční otáčky, snižuje se objemová účinnost. Řešením je navržení systému buď s odpojitelným rezonátorem, nebo s vícero rezonátory, které budou mít různé rezonanční otáčky.

3.3 COMPREX

Tlakový výměník Comprex vyvinula firma Brown Boveri v osmdesátých letech. Využívá tlakovou energii výfukových plynů na zvýšení plnicího tlaku v sacím potrubí. Princip je založený na odrazu tlakových vln v potrubí, kde se na otevřeném konci změni pozitivní a negativní vlna na vlnu opačného typu, čímž na uzavřeném konci dosáhne dvojnásobné amplitudy. [29]

Tlakový výměník se skládá z rotoru a kanálků, které jsou po stranách otevřené. Je potřebné dodávat další energii k jeho pohonu, avšak jen takové množství, které překoná ztráty z výměny plynů a ztráty v ložiskách výměníku. Výměník má nízkotlaký a vysokotlaký otvor po jeho stranách. Přes nízkotlakový otvor se část kanálků naplní vzduchem. Kanálky se rotací dostanou k vysokotlakému otvoru na výfukové straně. Důsledkem toho vzniká v kanálcích tlaková vlna, která vytlačí vzduch sacím vysokotlakovým otvorem dál do sacího potrubí. Směs vzduchu a výfukových plynů, která zůstala v kanálcích, se může po dalším pootočení rotoru dostat ven nízkotlakovým otvorem za vzniku další tlakové vlny. Tato vlna vytvoří podtlak a dorazí na druhý konec kanálku v okamžiku, kdy se pro ni znova zpřístupní nízkotlakový otvor na sací straně. [29]

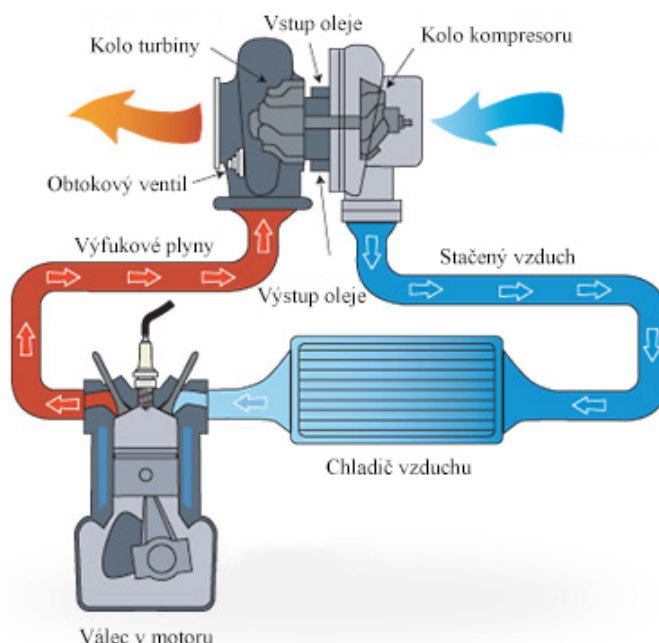


Obr. 3.1 Zařízení Comprex [11]

Za předpokladu dosažení co nejvyšší účinnosti je největším problémem správné ovládání a časování výměníku. Tlakové vlny se šíří rychlostí zvuku, která se mění s teplotou plynů a ne s otáčkami motoru nebo jeho jinou charakteristikou.

4 PŘEPLŇOVÁNÍ TURBODMYCHADLEM

Turbodmychadlo stlačuje vzduch proudící do spalovacího prostoru. Čím více vzduchu se dostane do spalovací komory, tím víc je možno dodat paliva, z čehož plyne, že více směsi vzduchu s palivem se spálí, tím větší výkon lze získat. Turbína pohánějící kompresor, která je s ním na společné hřídeli, se roztáčí výfukovými plyny vystupujícími z motoru.



Obr. 4.1 Schéma přeplňování turbodmychadlem [7]

Vzduch se po přechodu vzduchovým filtrem dostává do kompresorové skříně turbodmychadla. Tady je vzduch stlačen a tím se zvětší jeho hustota, ale také jeho teplota, což je nežádoucí. Teplý vzduch má horší odolnost vůči detonačnímu spalování a snižuje celkovou účinnost spalování. Proto je dnes většinou do systému zařazený mezichladič stlačeného vzduchu, který opětovně sníží teplotu stlačeného vzduchu a také sníží jeho hustotu. Poté vzduch proudí sacím potrubím a sacím kanálem do válce motoru. Když je směs vzduchu a paliva ve válci spálená, odchází horké výfukové plyny přes výfukový kanál a svody do turbínové skříně turbodmychadla, kde roztáčí turbínové kolo. Po přechodu turbínovou částí turbodmychadla ztratí výfukové plyny část svojí energie, která je využita ke stlačování vzduchu v turbodmychadle.

4.1 ZÁKLADNÍ ČÁSTI TURBODMYCHADLA

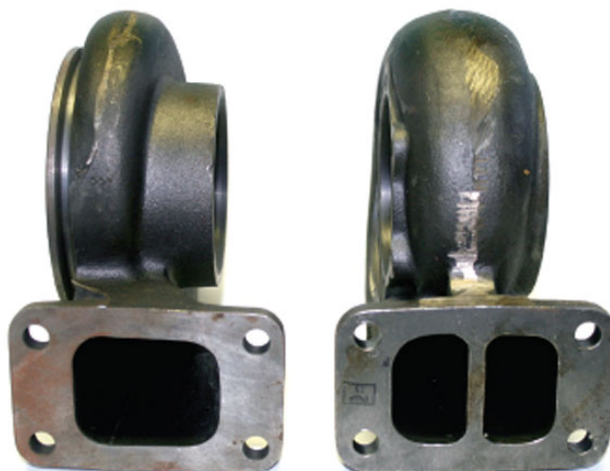
4.1.1 TURBÍNA

Turbína je zařízení, které se skládá ze dvou částí: lopatkového kola a krytu. Princip turbíny spočívá v tom, že odebírá část proudících výfukových plynů, které následně využívá k pohonu kompresoru. Odebíraná energie závisí na změně tlaku mezi výstupním a vstupním otvorem turbíny.

Podle směru průtoku vzduchu turbínou, rozlišujeme dva typy turbín: radiální a axiální. V axiálních turbínách proudící plyn směřuje axiálně k lopatkovému kolu turbíny. V radiální turbíně plyn proudí ke kolu radiálně, ale vychází z něj axiálně. Radiální turbíny se používají do výkonu 1000 kW. Při vyšších výkonech (nad 1000 kW) se využívají axiální turbíny. [30]

Zvyšování výkonu turbíny se děje v důsledku rozdílů tlaků mezi výstupem a vstupem. To znamená, že když je před turbínou větší množství plynů nebo teplota plynů je vyšší, tak je roztočení turbíny mnohem rychlejší. Průřez hrdla turbíny určuje její chování. Tlak plynů před turbínou vzrůstá se zužováním průřezu hrdla.

Turbínová skříň, pro turbodmychadla dieselových motorů, se vyrábí odléváním z tvárné litiny. U dmychadel provozovaných za vyšších teplot jsou skříň vyrobeny z vysokoteplotních materiálů.



Obr. 4.2 Turbína s jednoduchým a dvojitém výstupem [12]

Turbíny s dvojitém vstupem se využívají k lepšímu využití tlakových vln ve výfukovém potrubí. Při proudění vzduchu přes dvojitý vstupní otvor nedochází k interferenci při otvírání výfukových ventilů. Díky tomu se zvýší účinnost turbíny, jelikož dosáhne vyššího tlakového poměru za kratší dobu. Tyto turbíny jsou používány hlavně kvůli zvyšování výkonu v nižších otáčkách.



4.1.2 KOMPRESOR

Radiální kompresory používané v automobilech se obvykle skládají ze třech základních částí, a to lopatkového kola, difuzoru a krytu. Nasávání vzduchu do kompresoru probíhá axiálně a po zvýšení jeho rychlosti je vypouštěný radiálně. Funkce difuzoru spočívá ve zpomalování proudění vzduchu, čímž dochází ke zvýšení jeho teploty a tlaku.

Kompresorová skříň se vyrábí z hliníkových slitin. Používají se různé stupně odlévání tak, aby vyhovovaly dané aplikaci turbodmychadla. Při obrábění je potřebné dbát na správný tvar, aby se dosáhlo co možná nejvyššího výkonu.



Obr. 4.3 Kompresorová skříň [13]

Ke kompresorové skříni je připojena ložisková skříň, která je přišroubována, a z druhé strany se nachází tlumič. Tlumič (filtr) čistí vzduch před vstupem do kompresoru a zároveň snižuje hluk.

Do kompresorové skříně je vzduch nasáván pomocí kompresorového kola. Proud vzduchu směřuje k difuzoru a přes difuzor prochází spirálovitě stočenou skříní. Hlavní funkcí kompresorové skříně je správně nasměrovat vzduch ke kompresoru a následnému stlačení.

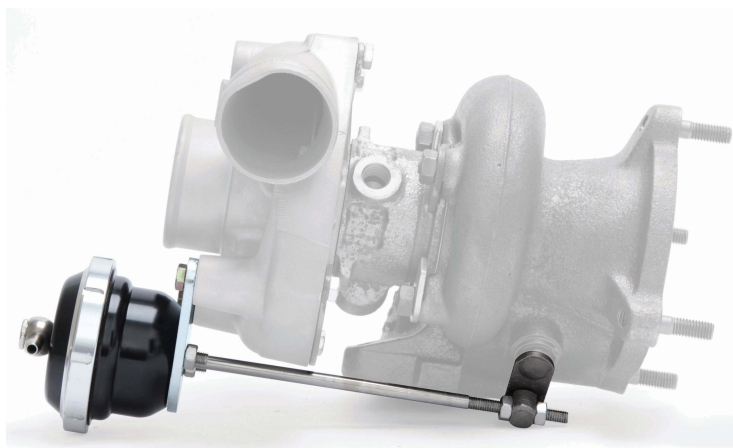


Obr. 4.4 Kompresorové kolo [14]

4.2 REGULACE TURBODMYCHADLA

4.2.1 OBTOKOVÝ VENTIL TURBÍNY

Jde o nejjednodušší formu ovládání plnicího tlaku. Velikost turbíny je navržena na dosažení požadovaných tlakových poměrů při poměrně nízkých otáčkách. Kdyby došlo k překročení těchto otáček, jejichž důsledkem by k turbíně proudilo nadměrné množství plynů, tak by se přebytečné výfukové plyny pomocí obtokového ventilu vypustily ven. Nejčastěji je otvíráný pomocí klapky, která je spojena s pružinou. Stlačení pružiny je závislé na tlaku před turbínou. Modernější způsoby řízení obtokového ventilu jsou přes elektronické systémy.

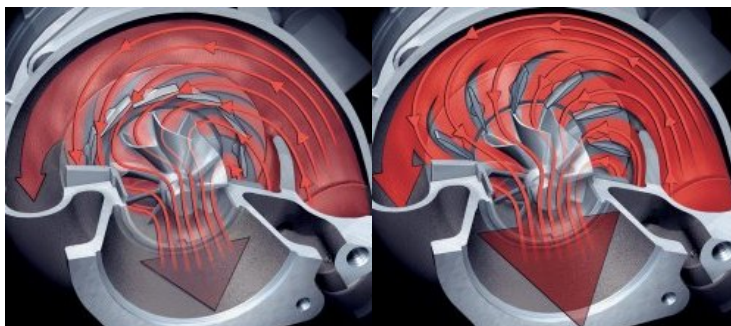


Obr. 4.5 Obtokový ventil turbíny [15]

4.2.2 VARIABILNÍ GEOMETRIE TURBÍNY

Jedná se o změnu průřezu otvoru turbíny v závislosti na otáčkách motoru. Tím je dosaženo větší efektivity vzhledem k různým provozním stavům a energie výfukových plynů je lépe využita. Účinnost takového systému je vyšší při použití obtokového ventilu.

Natáčením naváděcích lopatek, které jsou umístěné před lopatkovým kolem turbíny, se mění průřez. Natáčení probíhá tak, aby došlo k optimálnímu tlakovému poměru a co nejlepšímu výkonu turbíny. Průřez se zmenší při nižších otáčkách, čímž dochází ke zvýšení tlaku před turbínou. S růstem otáček se průřez zvyšuje.



Obr. 4.6 Natočení lopatek v nízkých a vysokých otáčkách [7]



4.2.3 ZMĚNA ŠÍŘKY STATORU TURBÍNY

V této metodě regulace se celé rozváděcí kolo turbíny i s lopatkami axiálně posouvá ve skříni v závislosti na otáčkách motoru. Reguluje ho tlak brzdového systému vozidla. Výhoda spočívá v tom, že proudění plynů turbínou probíhá nepřetržitě s optimálním úhlem náběhu.



5 VYUŽITÍ TURBODMYCHADEL V MOTORSPORTU

5.1 FORMULE 1

V roce 1977 umožnila pravidla týmům ve Formuli 1 použít buď atmosférické motory s objemem 3,0 litru, nebo přeplňované motory objemem 1,5 litru. Žádný z týmů, jako jsou Ferrari a Alfa Romeo, se nerozhodl využít možnosti přeplňování turbodmychadlem a pokračovali ve vývoji dvanáctiválcových motorů. Jediným týmem, který využil této šance, byl Renault a začal vyvíjet 1,5 litrový přeplňovaný motor.

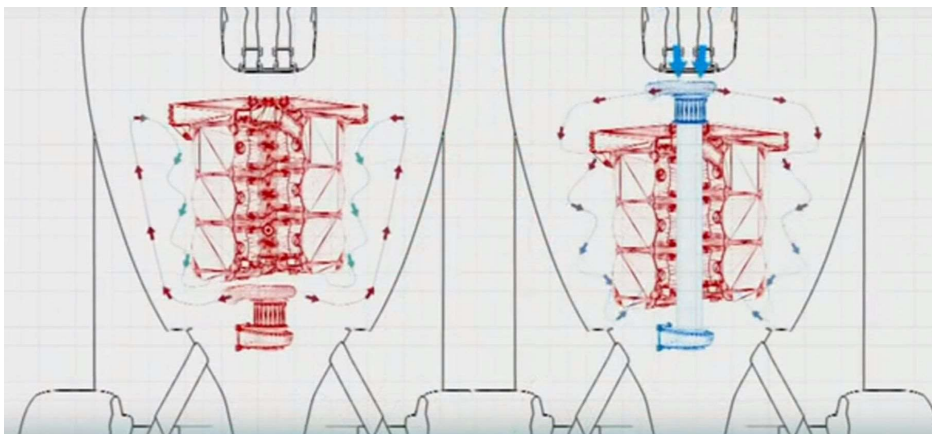
V roce 1989 byla turbodmychadla zakázána a týmy se musely navrátit k atmosférickým motorům s maximálním objemem 3,5 litru.

Až v roce 2014 FIA (Federation Internationale de l'Automobile) znovu umožnila použití pouze jednoho turbodmychadla ve spolupráci s 1,6 litrovým šestiválcovým motorem. Dále bylo také umožněno použití hybridních technologií. Tím se nahradily motory V8 o objemu 2,4 litru.

5.1.1 ROZDĚLENÍ TURBODMYCHADLA

Tato technologie se poprvé objevila u monopostu stáje Mercedes, kterou řídil Lewis Hamilton v roce 2014. Původně bylo celé turbodmychadlo umístěno na konci motoru (blíže zadní nápravě). Inženýři Mercedesu přišli s novou technologií – rozdělením turbodmychadla na dvě části. Turbínu nechali na stejném místě, ale kompresor posunuli před motor. Obě části byly propojeny jednou dlouhou hřídelí, která procházela přes celý motor. Toto rozdělení turbodmychadla mělo za důsledek: [16]

- kompresor je mnohem chladnější kvůli tomu, že se nenachází hned u rozžhavené turbíny
- kompresor se nachází nad hlavou řidiče, kde je otvor pro nasávání vzduchu
- je potřeba kratší sací potrubí, což má za příčinu, že zmenšuje „turbo efekt“, a také je možné použít menší mezichladiče vzduchu (zmenšení karoserie formule, snížení hmotnosti a zlepšení aerodynamiky)
- díky posunutí kompresoru do přední části motoru také vzniklo více prostoru v zadní části formule, tím pádem se mohla převodovka posunout blíže do středu formule – zlepšení rozložení váhy

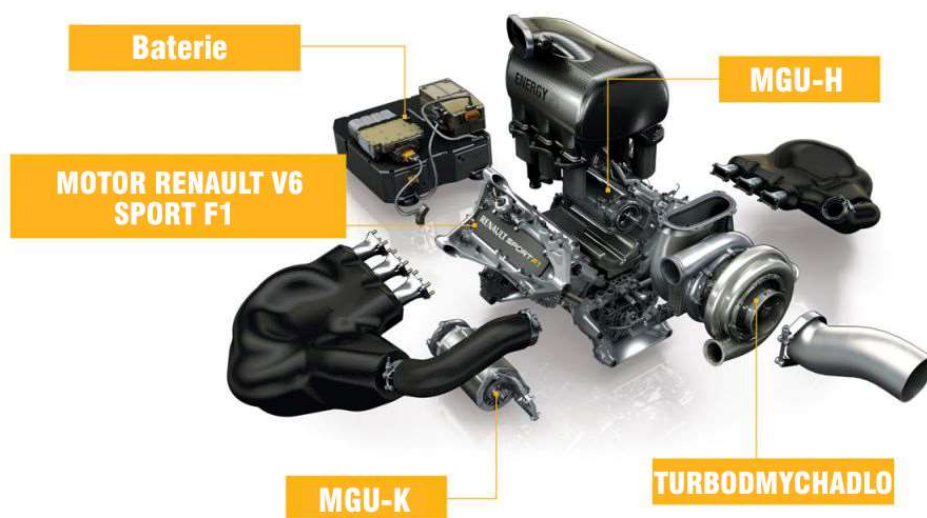


Obr. 5.1 Ukázka přemístění kompresoru do přední části motoru [16]



5.1.2 RENAULT F1 – V6 TURBO HYBRID

V roce 2014 vstoupily monoposty F1 do nové éry. Poprvé v historii jsou formule poháněny jak energií z paliva, tak i elektrickou energií. Pohonná jednotka se tedy neskládá jen z motoru s vnitřním spalováním, ale také z turbodmychadla, systému ukládající elektrickou energii a dvou generátorů (MGU-H a MGU-K). [17]



Obr. 5.2 Složení motoru Renault V6 Turbo Hybrid [17]

MGU-H

Během plné akcelerace motor spolupracuje s turbodmychadlem, které má otáčky kolem 100000 min^{-1} . MGU-H je připojeno pomocí hřídele k turbodmychadlu a pracuje jako generátor elektrické energie z výfukových plynů. Vytvořená elektrická energie jde do systému ukládající elektrickou energii – baterií. MGU-H se také používá jako elektrický pohon turbodmychadla, aby se zajistil dostatečný přívod vzduchu do motoru i v nízkých otáčkách (odstranění „turbo efektu“). [17]



Obr. 5.3 Umístění MGU-H [18]



MGU-K

MGU-K je připojena pomocí klikové hřídele k motoru. Při brždění se chová jako generátor elektrické energie, z otáčející se klikové hřídele, která je následně uložena v baterii. Při akceleraci je MGU-K napájeno pomocí baterie a chová se jako elektromotor pomáhající spalovacímu motoru při zrychlení. Jeho výkon je omezen na 120 kW nebo 160 koní. [17]



Obr. 5.4 Umístění MGU-K [18]

5.2 WORLD ENDURANCE CHAMPIONSHIP – LE MANS

První automobilovou společností, která využila turbodmychadlo v závodě na 24 hodin v Le Mans, byla Porsche. Stalo se tak v roce 1974, kdy jej nasadila do modelu 911 Carrera RSR Turbo. Turbodmychadlo společně s motorem boxer o objemu 2,1 litru a šesti válci produkovalo kolem 500 koní.

5.2.1 AUDI R18 E-TRON QUATTRO

V roce 2012 muselo Audi přistoupit ke zmenšení motoru V12 o objemu 5,5 litru, kvůli regulacím ze strany FIA. Došlo ke zmenšení počtu válců na výsledných 6 a zmenšení objemu motoru o 32%, na 3,7 litru. To však nemělo za následek zpomalení, neboť Audi R18 si i přes všechny regulace výkonu zlepšila čas na jedno kolo o 2,8 sekundy. K dosažení takového výkonu při menším počtu válců a menšímu objemu motoru vedlo ke zvýšení tlaků ve spalovací komoře. [19]

Audi spoléhá na vysoce efektivní koncepci motoru R18 - spolupráci mezi 3,7 litrovým dieselovým motorem s neobvykle tvarovaným tělem turbodmychadla a technologií VTG. [19]

Koncept přepřínování Audi R18 byl velmi dlouho dobře střeženým tajemstvím. Inženýři navrhli centrální monoturbodmychadlový systém, který byl umístěn do prostoru mezi válci v horní části motoru s kombinací vnitřního výfukového potrubí. Použitím pouze jednoho turbodmychadla Garrett došlo ke zvýšení celkové efektivity. Díky zasazení turbodmychadla do motoru, došlo k výraznému zkrácení potrubí pro tok výfukových plynů a tím k nižším ztrátám energie a vyššímu výkonu turbíny. Se zvýšeným výkonem turbíny se zvýšil i výkon kompresoru, který musí dodávat kolem 2000 m³ vzduchu za hodinu, aby docházelo k efektivnímu spalování paliva. Tohle turbodmychadlo dodává stejné množství vzduchu tak, jako dodávaly dvě turbodmychadla v motoru V10 u předešlého modelu. [19]



Výfukovými svody umístěnými uvnitř motoru proudí výfukové plyny radiálně do turbíny. Kryt turbínového kola má dva vstupy a jeden axiální výstup. Kompresor má velmi podobný tvar. Jeho úkolem je nasávat vzduch v axiálním směru z centrálního sání. Po kompresi vzduch proudí do dvou mezichladičů a poté do spalovacích komor motoru. [19]



Obr. 5.5 Turbodmychadlo z Audi R18 [19]

Variabilní geometrie turbíny poskytla další klíč k tomuto technologickému průlomů. Umožňuje řídit průtok výfukového plynu takovým způsobem, že se plynule nastavuje při měnících se provozních podmínkách. Bez variabilní geometrie turbíny by odezva jednoho většího turbodmychadla byla daleko větší. [19]

Pro turbodmychadlo pracující při extrémních teplotách dosahujících v turbíně až 1050°C musely být použity tepelně odolné slitiny oceli. Technologie, které odolávají vysokým teplotám a expanzi nesmí naopak při nízkých teplotách vykazovat žádné vůle. [19]

5.3 WORLD RALLY CHAMPIONSHIP

Zatímco v osmdesátých letech mohly týmy přijít s jakýmkoli technologickými inovacemi k vylepšení jejich aut (např. Lancia použila v modelu Delta S4 kompresor i turbodmychadlo), se nyní musí týmy držet striktních pravidel. Všechny týmy musí používat stejné turbodmychadlo od společnosti Garrett se stejně velkým restriktorem, ke kontrole průtoku vzduchu o velikosti 34 mm.

Hlavním rozdílem mezi turbodmychadly, pro vozidla WRC a pro sériově vyráběné vozy, je v hmotnosti a tepelné stabilitě. Při výrobě turbodmychadel se používají dražší kovy (slitiny hořčíku) kvůli tenčí stěně turbíny. Ty zajistí třikrát až čtyřikrát menší hmotnost, než u sériových turbodmychadel. Těmto požadavkům vyhovuje turbodmychadlo Garrett TR30R, které je v této soutěži nejrozšířenější. Ke zlepšení proudění plynů, turbodmychadlo využívá nerozdělený vstup do turbodmychadla a externí obtokový ventil. Další výraznou odlišnost najdeme



u kuličkového ložiska. Klasické ocelové kuličky byly nahrazeny keramickými, které jsou daleko více odolné vysokým teplotám dosahujícím 1100°C a poskytují vyšší rozměrovou stálost.

Další odlišností od sériových turbodmychadel je systém pro rychlé odmontování a následný servis. Všechny tyto vylepšení se však projevují na pořizovací ceně, která je mnohonásobně vyšší než cena klasických turbodmychadel.

Pro rok 2017 si FIA připravila změnu pravidel ve velikosti restriktoru. Z původního průměru 33mm se navýší na 36mm. U motorů s objemem 1,6 litru dojde k navýšení výkonu z 224 kW na 283 kW neboli 385 koní a to při zachování plnicího tlaku 2,5 baru. [25]

5.4 WORLD TOURING CAR CHAMPIONSHIP

Při pohledu na regulace výkonu zjistíme, že se velmi podobají regulacím ve WRC. Základem všech aut je 1,6 litrový motor se čtyřmi válci a přímým vstřikováním. Přímé vstřikování je omezeno maximálním tlakem na 200 barů. Maximální otáčky motoru nesmí překročit hodnotu 8500 min⁻¹. [24]

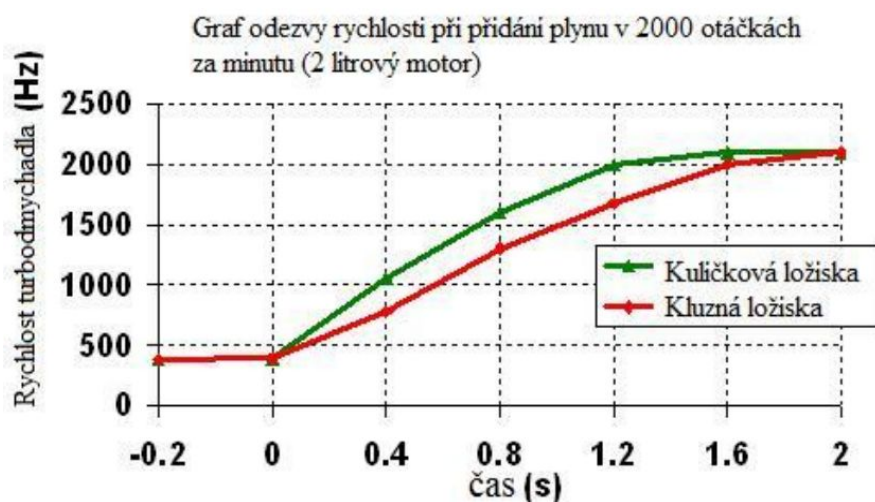
Co se týče turbodmychadel, opět se využívají turbodmychadla od firmy Garrett. Maximální plnicí tlak je omezen na 2,5 baru. V souladu s technickými předpisy musí být do sacího potrubí nainstalovaný restriktor o průměru 33 mm. Vzhledem k tomu, že je přívod vzduchu omezen restriktorem, je hodnota maximálního výkonu (přibližně 300 koní) dosaženo až kolem 6000 min⁻¹. [24]



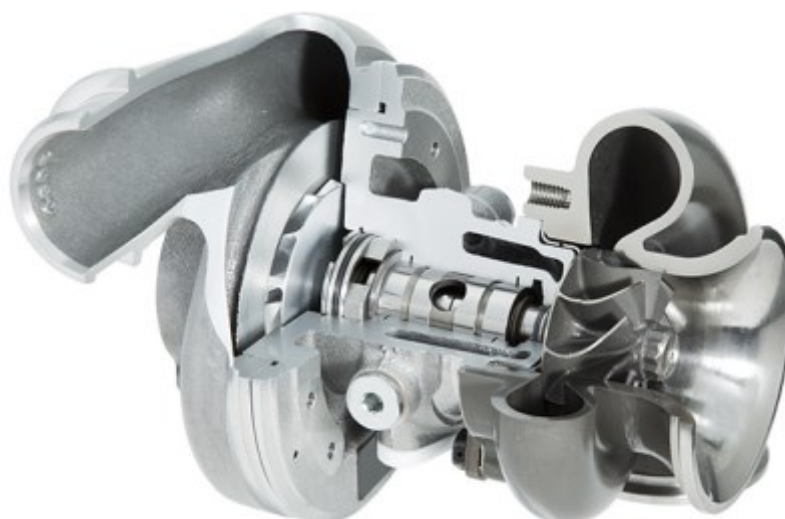
6 POROVNÁNÍ TURBODMYCHADEL PRO MOTORSPORT A KOMERČNÍ VYUŽITÍ

6.1 KLUZNÁ A KULIČKOVÁ LOŽISKA

Jedním ze zásadních rozdílů při konstrukci turbodmychadel je použití ložisek (kluzných a kuličkových). Ložiska kluzná najdeme spíše v turbodmychadlech, která jsou vyráběna pro sériové vozy. Kuličková ložiska se nejvíce používají u vozidel dražších nebo určených pro motorsport. Mezi hlavní důvody patří cena, doba rozběhu turbodmychadla a možnost použití keramických kuliček namísto ocelových.



Obr. 6.1 Graf rozběhu turbodmychadla v závislosti na čase [20]



Obr. 6.2 Uložení kuličkového ložiska [21]



6.2 POUŽITÉ MATERIÁLY

V mnoha ohledech musí turbodmychadlo určené pro motorsport splňovat mnohem přísnější kritéria než turbodmychadlo určené pro komerční využití. Použitím ušlechtilých materiálů, jako jsou titan a hořčík, se dá dosáhnout daleko menší hmotnosti a rozměrové stability za vyšších teplot, při zachování nebo zlepšení výkonových parametrů. To pomáhá závodním týmům dosáhnout lepšího rozložení hmotnosti vedoucího ke snížení těžiště, lepší dynamice a ovladatelnosti vozidla.

6.3 ŽIVOTNOST A CENA

Životnost turbodmychadel pro komerční a sportovní využití se velmi liší. U komerčních turbodmychadel se určuje životnost v závislosti na najetých kilometrech. Automobilový výrobce Škoda Auto dimenzuje turbodmychadla zhruba na 250 tisíc kilometrů [23]. Ovšem ve skutečnosti záleží na mnoha faktorech, jako jsou údržba, styl jízdy a další, které životnost snižují. U turbodmychadel určených pro Formuli 1 je životnost navrhována na 50 hodin. Takto malou životnost způsobují vysoké teploty výfukových plynů, rychlost otáček turbíny a tedy i kompresoru, vysoký plnicí tlak, zmenšení tloušťky stěn turbíny a kompresoru.

Při využití všech dostupných nejmodernějších technologií se cena poměrně zvýší. Cena turbodmychadla určeného pro motorsport je mnohonásobně vyšší než u turbodmychadla pro komerční využití.



7 SROVNÁNÍ KATEGORIÍ V MOTORSPORTU

Tabulka 7.1 Srovnání regulací vybraných parametrů v jednotlivých soutěžích [26]

Kategorie	Formule 1	Le Mans	WRC	WTCC
Maximální objem motoru [cm ³]	1600	5500	1600	1600
Počet válců	6	6 ¹⁾	4	4
Maximální výkon [kW]	560–630 ¹⁾	390–725 ¹⁾	224	220
Maximální otáčky [min ⁻¹]	15000	5000–9000 ¹⁾	8500	8500
Maximální tlak turbodmychadla [bar]	3,5	4	2,5	2,5
Průměr restriktoru [mm]	Nepoužívá se	Nepoužívá se	33	33
Použití hybridních technologií	Ano, max. 120kW	Ano, max. 300kW	Ne	Ne

Poznámka: ¹⁾ Není omezeno pravidly, uvedena nejčastější dosahovaná hodnota.

V tabulce můžeme vidět srovnání vybraných parametrů z jednotlivých soutěží. Maximální povolený objem motoru je u Le Mans, kde nesmí přesáhnout 5500 cm³. Avšak takového objemu využívají pouze benzínové atmosférické motory. Ve zbylých třech soutěžích je povolen maximální objem pouze 1600 cm³, z čehož lze usoudit, že tyto tři soutěže zasáhl downsizing nejvíce.

Použití restriktoru se nachází pouze u vozidel ve WRC a WTCC, která mají povoleno používat nižší maximální plnicí tlak 2,5 baru. U automobilů ve zbylých dvou soutěžích restriktor nenalezneme, zato se vyznačují použitím hybridních technologií.

Turbodmychadla se ve vytrvalostním závodě Le Mans začaly hlavně používat kvůli nástupu dieselových motorů. Díky turbodmychadlům se dá lépe reagovat na neustále se měnící regulace maximálního spotřebovaného paliva v závodě. Nynější Audi R18 má spotřebu nižší o 32,4% než jeho první generace v roce 2011. [22]

I ve Formuli 1 se zavedly regulace v množství paliva spotřebovaného za závod, což mělo za důvod znovuzavedení turbodmychadel a pokračování v downsizingu. Jak již bylo zmíněno, turbodmychadla ve Formuli 1 se dimenzují na 50 hodin provozu. Vzhledem k povaze závodu, je potřeba co nejvyššího výkonu na relativně krátkou dobu v porovnání se závadem Le Mans.



ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zmapovat použití turbodmychadel v motorsportu a následné porovnání jednotlivých kategorií motorsportu. Byly naznačeny regulace, kterými se musí daná soutěž řídit a porovnání použitých technologií vzhledem k turbodmychadlům určených k civilnímu užití.

Turbodmychadla se postupem času staly nedílnou součástí motorů pro závodní automobily. Díky penězům investovaných do vývoje turbodmychadel pro závodní účely se vývoj velmi urychlil. Nyní můžeme některé technologie nalézt i v civilních osobních automobilech.

Největší výhodou turbodmychadel je ta, že využívají energie výfukových plynů, která by jinak zůstala nevyužitá, a nepotřebují žádný další pohon, který by zatěžoval motor. Navíc s nástupem hybridních technologií se dá využít rotace turbíny ke generování elektrické energie a následnému pohonu turbodmychadla při nízkých otáčkách motoru. Tyto hybridní technologie najdeme bohužel zatím jen v drahých hyper sportovních vozech.

V dnešní době nalezneme turbodmychadla v téměř každém novém sériově vyráběném vozidle, ať už s benzínovým nebo dieselovým motorem. Důvodem toho je neustálé zpřísňování norem pro plnění emisních limitů vedoucích k downsizingu a použití turbodmychadla pro zachování nebo i zvýšení výkonu motoru.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] T. K. GARRETT, K. NEWTON, W. STEEDS., T.K. Garrett, K. Newton, W. Steeds. *The motor vehicle*. 13th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0750644494.
- [2] HOFMANN, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: Přepřňování spalovacích motorů*. Praha: SNTL, 1985. 134s.
- [3] HOFMANN, Karel. *Alternativní pohony*. [online]. Studijní opory, VUT FSI Brno. 73 s. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <<http://www.iae2.fme.vutbr.cz/opory/Alt.pohony.pdf>>
- [4] SAJDL Jan. Downsizing motoru [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <<http://www.autolexicon.net/cs/articles/downsizing-motoru/>>
- [5] *Spalovací motory*. [online]. Studijní opory, VUT FSI Brno. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <<http://www.iae2.fme.vutbr.cz/opory/Spalovací.motory.2005.pdf>>
- [6] *Přepřňování* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <<http://www.autodoplňky.cz/jak-na-tuning/preplnovani-a65977>>
- [7] *Turbocharging*. [online]. [cit.2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.autozine.org/technical_school/engine/Forced_Induction_1.html>
- [8] *Vin Diesel's The Fast and The Furious Dodge Charger* [online]. [cit.2016-04-19]. Dostupné z: <<http://zerotosixtyone.blogspot.cz/2013/03/vin-diesels-fast-and-furious-dodge.html>>
- [9] *About Lysholm* [online]. [cit.2016-04-19]. Dostupné z: <<http://www.lysholm.us/about.php>>
- [10] *Superchargers* [online]. [cit.2016-04-19]. Dostupné z: <<http://www.pakwheels.com/forums/mechanical-electrical/13629-super-chargers>>
- [11] *Přepřňování Comprex* [online]. [cit.2016-04-19]. Dostupné z: <<http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=43333&docGroup=-1&cmd=0&instance=4>>
- [12] *Anatomy of a Turbocharger: What's inside and How it Works* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <<http://www.carttechbooks.com/techtips/anatomy-of-a-turbocharger-whats-inside-and-how-it-works/>>
- [13] *Turbochargers parts* [online]. [cit.2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.turbocompressori.net/turbochargers_parts.htm>
- [14] *Kompresorové kolo turba Audi A6, 2,7 T, 169kW, rv.99-01, Motor: AJK V6* [online]. [cit.2016-05-12]. Dostupné z: <<http://www.azturbo.cz/cz-detail-961416-audi-a6-2-7-t-169kw-rv.99-01-kompresorove-kolo.html>>
- [15] *How does a Wastegate work?* [online]. [cit.2016-05-12]. Dostupné z: <<http://www.turbosmart.com.au/news/how-does-a-wastegate-work>>



- [16] *How Mercedes become so strong in 2014*. In: Youtube [online]. 06.04.2014 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=NuBB2F6IutQ>. Kanál uživatele aleenfl.
- [17] *RENAULT ENERGY F1-2015* [online]. [cit.2016-05-14]. Dostupné z: http://www.renaultsport.com/IMG/pdf/rsf1-presskit-2015-en_v6.pdf
- [18] *F1 2014 - Renault Sport F1 - V6 turbo hybrid*. In: Youtube [online]. 13.03.2014 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=1R1ZF9j3NoE>. Kanál uživatele Renault Sport Formula One Team.
- [19] *Audi R18 e-tron Quattro Flywheel KERS Hybrid System (2012)* [online]. [cit.2016-05-15]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/kers_audi_e_tron.html
- [20] *Garrett by Honeywell, GARRETT Turbochargers* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://turbobygarrett.com/turbobygarrett/>
- [21] *High-heat-resistant ball bearing unit for automobile turbocharger* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.nmbitalia.it/innovation/>
- [22] *Audi unveils redesigned R18 diesel hybrid Le Mans racer for 2016 season* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2016/03/20160322-r18.html>
- [23] *Moderní motor vydrží hravě čtvrt milionu km, nevadí mu ani 1100 otáček* [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/moderni-motor-vydrzi-hrave-ctvrt-milionu-km-nevadi-mu-ani-1100-otacek-1fn-/automoto.aspx?c=A100420_111826_automoto_fdv
- [24] *Civic WTCC race car - Background - Development - History - And Wrapupseason* [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.hondasacuras.com/2013/06/civic-wtcc-race-car-background.html>
- [25] *NEW REGULATIONS COMING FOR THE 2017 WORLD RALLY CAR* [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.fia.com/news/new-regulations-coming-2017-world-rally-car>
- [26] *FIA Regulations*. *FIA.com*. [online]. ©2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.fia.com/regulations>
- [27] LÁNÍK, Ondřej. Přepřínování (1. díl): Teorie+mechanické přepřínování. In: Auto.cz [online]. 20.7.2004 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/preplnovani-1-dilteorie-mechanicke-preplnovani-16778>
- [28] *Sací potrubí, část 5 Rezonátory* [online]. 2016 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://www.honda-club.cz/forum/cms_view_article.php?aid=191
- [29] GARRETT, T.K.; NEWTON, K.; STEEDS, W. *The Motor Vehicle*. Thirteenth edition. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. 1214 s. ISBN 0750644494.



- [30] *Design and Function of a Turbocharger: Turbine* [online]. 2016 [cit. 2016-05-19].
Dostupné z: <<http://www.turbos.bwauto.com/products/turbochargerTurbine.aspx>>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

F1		Formule 1
AMG	[-]	Aufrecht-Melcher-Grossaspach
FIA	[-]	Federation Internationale de l'Automobile
H_u	$[J \cdot kg^{-1}]$	Výhřevnost paliva
i	[-]	Počet válců motoru
MGU-H	[-]	Motor Generating Unit – Heat
MGU-K	[-]	Motor Generating Unit - Kinetic
n	$[min^{-1}]$	Otáčky motoru
p_e	$[MPa]$	Plnicí tlak
P_e	$[W]$	Efektivní výkon motoru
TDI	[-]	Turbocharged Direct Injection
V_H	$[dm^3]$	zdvihový objem jednoho válce
VTG	[-]	Variable Turbine Geometry
WRC	[-]	World Rally Championship
WTCC	[-]	World Touring Car Championship
η_i	[-]	Indikovaná účinnost motoru
η_m	[-]	Mechanická účinnost
λ_z	[-]	Spalovací součinitel přebytku vzduchu
ρ_{pl}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota plnicího vzduchu
σ_t	[-]	Teoretický směšovací poměr vzduchu a paliva
τ	[-]	Taktnost motoru



SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2.1 Grafy vývoje výkonu a točivého momentu [6]	19
Obr. 2.2 Schéma Rootsova dmyhadla [7]	20
Obr. 2.3 Umístění Rootsova dmyhadla na 1970 Dodge Charger [8].....	20
Obr. 2.4 Lysholmovo dmyhadlo [7]	21
Obr. 2.5 Umístění Lysholmova dmyhadla ve Fordu GT [9]	21
Obr. 2.6 Radiální odstředivé dmyhadlo [10]	22
Obr. 3.1 Zařízení Compres [11]	24
Obr. 4.1 Schéma přepřňování turbodmyhadlem [7]	25
Obr. 4.2 Turbína s jednoduchým a dvojitým výstupem [12].....	26
Obr. 4.3 Kompresorová skřň [13]	27
Obr. 4.4 Kompresorové kolo [14]	27
Obr. 4.5 Obtokový ventil turbíny [15].....	28
Obr. 4.6 Natočení lopatek v nízkých a vysokých otáčkách [7]	28
Obr. 5.1 Ukázka přemístění kompresoru do přední části motoru [16].....	31
Obr. 5.2 Složení motoru Renault V6 Turbo Hybrid [17]	32
Obr. 5.3 Umístění MGU-H [18]	32
Obr. 5.4 Umístění MGU-K [18]	33
Obr. 5.5 Turbodmyhadlo z Audi R18 [19]	34
Obr. 6.1 Graf rozběhu turbodmyhadla v závislosti na čase [20]	37
Obr. 6.2 Uložení kuličkového ložiska [21].....	37



SEZNAM TABULEK

Tabulka 7.1 Srovnání regulací vybraných parametrů v jednotlivých soutěžích [26].....	39
--	----